第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

内蒙古河套地区一次对流暴雨的中尺度对流系统演变特征

黄晓璐[1]， 李瑞青[2]， 李林惠[3]， 林弘杰[4]， 姚乐宝[1]

（1. 内蒙古自治区气象台,内蒙古 呼和浩特 010051； 2. 内蒙古大学,内蒙古 呼和浩特 010020； 3. 内蒙古自治区气象局,内蒙古 呼和浩特 010051； 4. 内蒙古自治区气象干部培训学院,内蒙古 呼和浩特 010051）

摘 要：利用常规观测资料、FY4A卫星、多普勒天气雷达及再分析等资料,对2018年7月19日内蒙古河套地区大暴雨过程的环流背景、环境场条件和中尺度对流系统(MCS)的演变特征进行了分析。结果表明:(1) 副热带高压稳定少动、500 hPa高空槽、低层切变线及西南急流、300 hPa高空急流和地面低压的配合为本次对流暴雨过程提供了有利的环流背景。(2) 低层持久的西南急流提供充足水汽输送,假相当位温高能舌、深厚暖云层、较高强度的对流有效位能、高空槽后冷平流入侵和上干下湿的不稳定气层为强对流暴雨的产生提供了较好的环境条件。(3) 东西向和南北向先后生成的MCS共同导致大暴雨过程的发生,对流暴雨主要是由于东西向MCS沿阴山山脉缓慢移动产生,20 $mm \cdot h^{-1}$的强降水出现在上风向云团边缘及云顶亮温(TBB)梯度大值区附近。(4) 东西向带状回波移动速度缓慢且移动方向与回波长轴方向基本平行,强回波自西向东缓慢移动形成显著的“列车效应”,造成了5 h以上的连续性强降水,南北向带状回波持续时间更长,但移动方向与回波长轴方向垂直,且移动速度较快,所以产生的暴雨强度较东西向弱。(5) 地面中尺度辐合线是触发中尺度对流系统的主要原因,河套地区的复杂地形及低空急流的脉动进一步促进了对流触发,地面中尺度辐合线与阴山山脉呈现几乎重叠的分布,有利于降水的持续,促使本次对流暴雨过程的发生。

关键词：对流暴雨；中尺度对流系统；列车效应；河套地区；内蒙古

暴雨是内蒙古夏季主要的灾害性天气,近年来伴随全球气候变暖,极端暴雨事件频发,在内蒙古河套地区呈现更为明显的增长趋势[1-4]。内蒙古河套地区地形复杂,沙漠、山地和绿洲等交替分布,处于干旱半干旱区,生态环境十分脆弱,发生的暴雨事件具有范围集中、突发性强的特点,容易引发山体滑坡、泥石流和山洪等次生灾害,不仅影响该地区的生产生活,有时还会带来人员伤亡和严重的经济损失。

大暴雨过程在干旱半干旱地带出现概率较低,对其强度和落区的预报是难点。大暴雨的发生多以伴随短时强降水的对流性暴雨过程为主,是多尺度系统相互作用的产物[5]。很多学者从环流背景、水汽条件和物理量的演变等方面对干旱半干旱地带的暴雨过程进行了深入研究[6-9],近年来,随着雷达、卫星、自动站等多源高分辨率资料的应用,对流暴雨的特征及中尺度影响系统的研究越来越深入[2,10]。对流暴雨通常在有利的环流背景下由中小尺度系统触发产生[10-15],在适宜的环境条件下,低层风切变、低空急流风速脉动、边界层辐合线和地形的共同作用是触发中尺度对流系统(MCS)发生和发展的主要原因[16-17],有利的动力热力因素,对MCS的加强和传播起到重要作用[18],地形对MCS的发生发展也有重要的影响,复杂地形有利于低层出现辐合中心,山脉的阻挡作用促进动力抬升和对流单体的后向传播,从而影响MCS的维持和发展[19-22]。

以往对内蒙古河套地区暴雨成因的研究工作较多[23-25],但缺乏对河套地区对流性暴雨的中尺度

收稿日期：2022-04-16； **修订日期：**2022-07-07
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金(2019BS04001,2021MS04019);内蒙古大学高层次人才科研启动项目(10000-22311201/017);国家自然科学基金重点项目(42030604)资助
作者简介：黄晓璐(1991-),女,硕士,工程师,主要从事短时临近天气预报及其相关方法研究. E-mail: 674222133@qq.com
通讯作者：李瑞青. E-mail:liruiqing217@126.com

系统演变特征及形成机制等的深入分析。2018年7月19日内蒙古河套地区发生一次大暴雨天气过程,强降水主要发生在阴山山脉南麓,导致多地出现城市内涝,通讯信号中断,并引发了山洪灾害,造成了5人死亡,损失十分惨重。本文通过分析此次河套地区中尺度对流系统演变特征和触发机制,以期为提高该地区对流暴雨的预报提供一定的理论依据和指示作用。

1 资料选取

资料为2018年7月19日02:00—16:00,所用观测资料包括地面加密自动站资料、FY-4A高分辨率红外云图资料和内蒙古鄂尔多斯市多普勒天气雷达观测资料等;所用再分析资料包括美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)FNL资料(空间分辨率1°×1°,时间分辨率6 h)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据ERA5资料(空间分辨率0.25°×0.25°,时间分辨率1 h)。DEM资料来自于国家基础地理信息数据库,为全球数字高程模型GTOPO_DEM_30(空间分辨率1 km×1 km)。

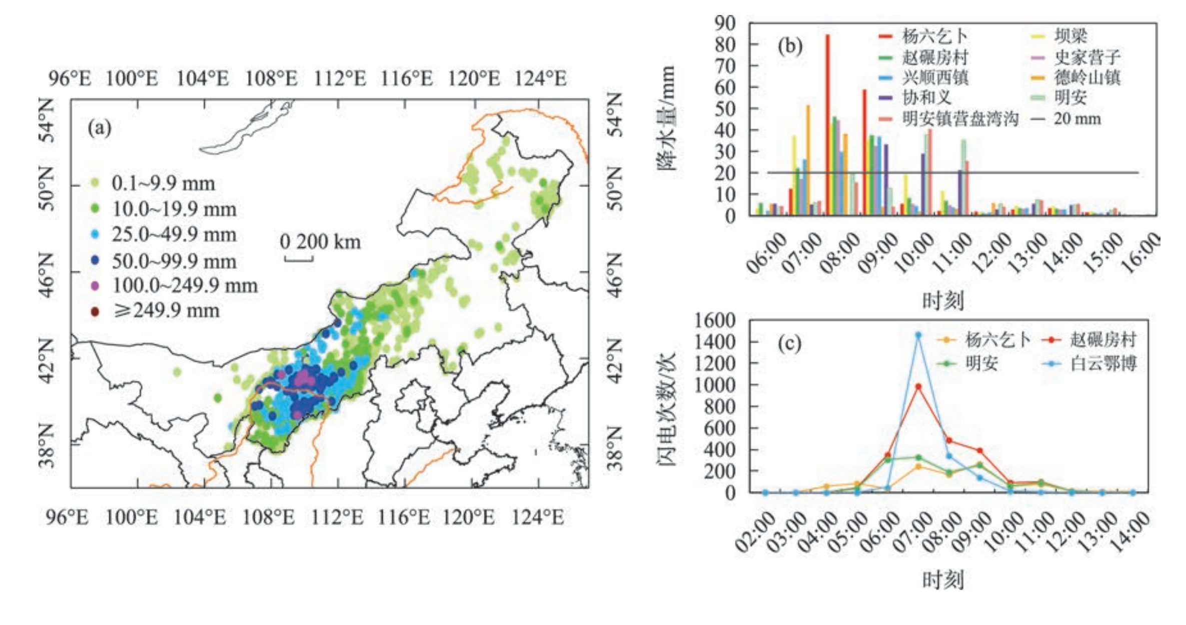
2 降水概况及特点

2018年7月19日内蒙古河套地区出现了一次大暴雨过程,图1a给出了2018年7月19日06:00—18:00累计降水量。由图可见,本次过程降水范围广,强降水落区成东西走向的带状分布特征,大暴雨和暴雨落区主要出现在阴山山脉南麓一带,仅12 h就有10个站出现100 mm以上降水,24 h最大降水量达174.5 mm(包头市杨六乞卜)。降水主要出现在19日06:00—15:00(图1b),100 mm以上站点中有9个站连续多次出现短时强降水(1 h降雨量≥20 mm),其中包头市杨六乞卜在19日07:00—08:00期间1 h降水量达到84.7 mm,出现了极端短时强降水事件。本次大暴雨过程还伴随雷电、雷暴大风等强对流天气,从19日04:00—14:00逐小时闪电次数变化如图1c所示,雷电出现时间长达10 h以上,较强频次时段出现在19日06:00—10:00,最强出现在包头市白云鄂博达1460次。综上所述,本次降水过程具有雨强大、大暴雨区范围集中、雷暴和短时强降水持续时间长、对流性降水特征明显并与地形密切相关的特点。

3 环流背景和环境场条件

3.1 环流特征

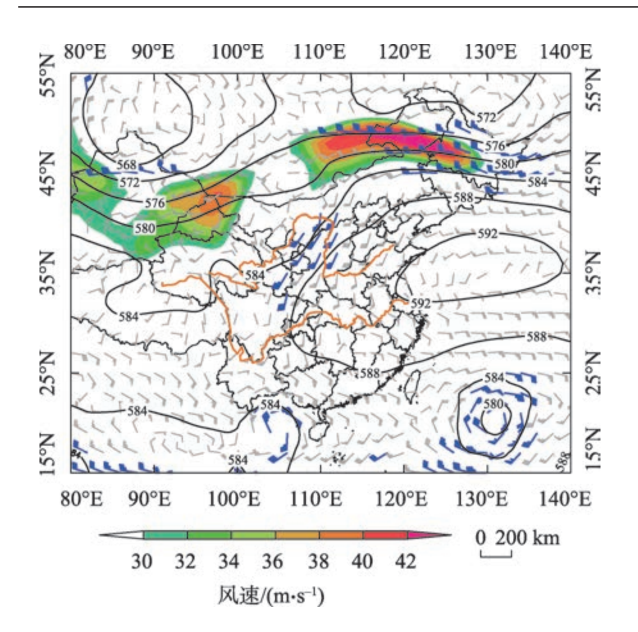
内蒙古河套地区的暴雨是发生在西太平洋副热带高压边缘的一次对流性暴雨,图2为19日08:00



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。下同。

图1 7月19日06:00—18:00内蒙古累计降水量分布(a)、逐小时降水量分布(b)及闪电次数逐小时变化(c)

Fig. 1 Distribution of accumulated rainfall of Inner Mongolia from 06:00 to 18:00 (a), hourly rainfall (b) and hourly lighting of meteorological stations (c) on19 July, 2018



注:黑色等值线:500 hPa高度场;风羽:700 hPa风场;蓝色代表低空急流;阴影:300 hPa高空急流。

图2 7月19日08:00高空综合图

Fig. 2 Comprehensive field of high level at 08:00 on 19 July, 2018

500 hPa高度场、700 hPa风场和300 hPa高空急流的综合图。对流层高层300 hPa有较强的高空急流存在,中心轴风速达42 $m\cdot s^{-1}$以上,河套地区位于高空急流入口区右侧,强烈的辐散抽吸作用有利于上升运动增强;500 hPa中高纬地区为"西低东高"的环流形势,西太平洋副热带高压呈东西带状位于长江中下游地区,受热带地区台风影响,西太平洋副热带高压外围588 dapm线西伸到内蒙古河套以南地区,且在本次暴雨过程中稳定维持,有利于热带和副热带地区的暖湿气流沿副热带高压不断地输送到河套地区;在河套地区上游有高空槽东移,槽后干冷空气与暖湿空气交汇有利于强对流天气的产生;700 hPa受西南风低空急流和"人"字型切变线的共同影响,河套地区位于低空急流的左前侧和暖式切变线的南侧,强烈的辐合上升运动为本次过程提供有利的动力条件。大暴雨区主要发生在地面低压中心附近(图略),02:00时地面温度在28 ℃左右,低层暖湿具备强对流天气发生的潜势。本次过程中副热带高压的稳定维持、500 hPa高空槽、700 hPa切变线及西南低空急流、300 hPa高空急流和地面低压为本次暴雨过程提供了有利的大尺度环流背景场,但暴雨或大暴雨的发生还需要充足的水汽条件、层结条件和抬升等条件的相互配合,下面从环境场条件方面分析本次暴雨天气的成因。

3.2 环境场条件

3.2.1 水汽条件 由图3a可见,从30°N到河套地区有一条明显的水汽输送带,与700 hPa西南风暖湿急流相对应,低空急流的形成和维持与本次暴雨过程的发生有密切关系。低空急流强度不断加强在

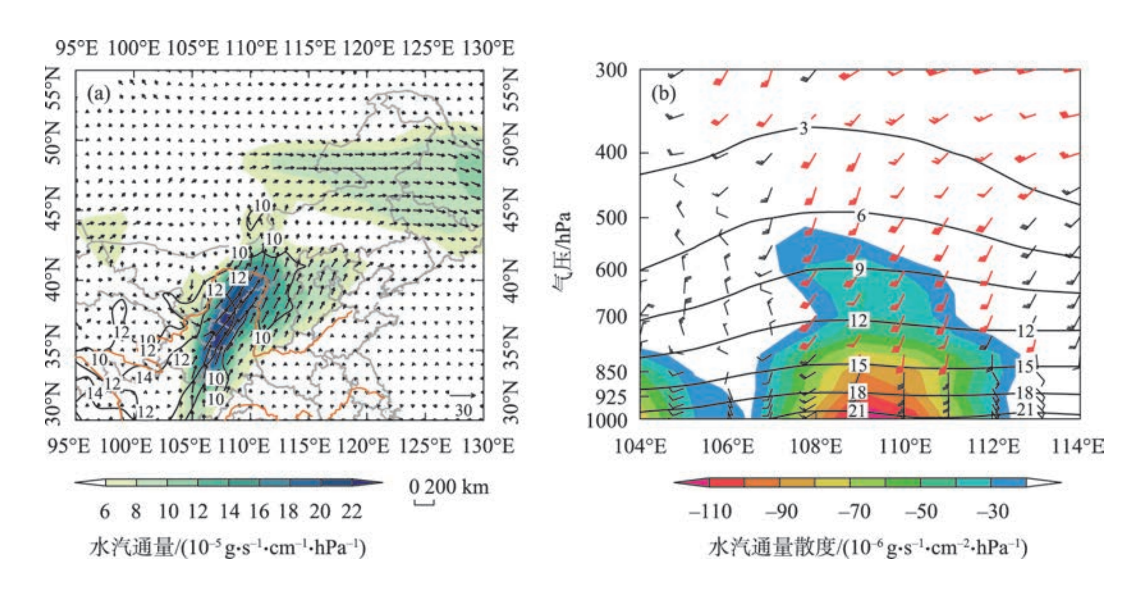


图3 7月19日08:00 700 hPa水汽通量(阴影,单位:10^{-5} $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$)和比湿(等值线,单位:$g\cdot kg^{-1}$)分布(a),水汽通量散度(阴影,单位:$10^{-6}$ $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}$)、风场(单位:$m\cdot s^{-1}$)和比湿(等值线,单位:$g\cdot kg^{-1}$)沿40°N的剖面图(b)

Fig. 3 The distribution of 700 hPa water vapor flux (shaded, units: 10^{-5} $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$) and specific humidity (contour line, units: $g\cdot kg^{-1}$) (a); the profile of water vapor flux divergence (shaded, units: 10^{-6} $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}$), wind (units: $m\cdot s^{-1}$) and specific humidity along 40°N (b) at 08:00 on 19 July, 2018

08:00达最强，中心风速可达18 m·s^{-1}，低空急流的稳定少动，在暴雨区上空维持时间超过12 h，大暴雨区域位于低空西南急流出口区左前侧，一方面有利于气旋性切变的生成，另一方面不断为低层带来暖湿气流。在河套地区有大于20×10^{-5} g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}的水汽通量高值舌深入，促进水汽的输送，增强大气层结不稳定性。700 hPa强降水区比湿大于10 g·kg^{-1}，08:00呈明显的湿舌，最大值达12 g·kg^{-1}。沿大暴雨区做剖面（图3b）可见，强降水期间，850~500 hPa的比湿稳定维持在6~15 g·kg^{-1}之间；在大暴雨区，水汽通量的高值区与水汽通量散度辐合区域接近重合，中低层存在显著的西南急流，有利于水汽的垂直输送，从地面到500 hPa有明显的水汽通量散度辐合区，500 hPa以上是辐散区，进一步促进水汽的积聚，可见水汽垂直累积也十分深厚。

本次大暴雨过程的水汽输送主要来自中低层的西南风急流，不仅促进低层动力辐合抬升，其稳定维持还有利于南方暖湿气流的持续输送，促进大暴雨区水汽的辐合积聚。包头市杨六乞卜在07:00—08:00出现接近90 mm的极端短时强降水，与低空急流促进作用下湿度显著增大是分不开的。

3.2.2 *层结稳定度* 假相当位温θse是一个表征大气温度、压力和湿度的综合特征量，其水平和垂直分布能反映大气的能量分布和层结稳定度[19]。对19日08:00 θse和温度平流沿40°N（大暴雨区）做垂直剖面（图4a），由图4a可见，地面到500 hPa假相当位温θse随高度垂直递减，呈倒漏斗状分布，垂直梯度不断增大，存在明显的对流不稳定层结；在大暴雨区（107°~110°E），θse水平梯度在低层更为显著，说明此处存在能量锋区，大气湿斜压性明显，有利于中尺度对流系统的发生和发展。温度平流在大暴雨区整层呈现暖平流，低层暖平流非常强，上游地区中高层受西北风影响，有冷平流入侵，冷暖平流的交汇有利于大暴雨地区不稳定能量的触发。图4b给出19日08:00 700 hPa假相当位温θse和K指数的水平分布，θse呈“Ω”形分布，θse高能舌向北延伸至河套及以北地区，有利于不稳定能量的积聚，大暴雨区的K指数在40 ℃及以上，对流有效位能普遍在300~1000 J·kg^{-1}（图略），可见从各方面不稳定能量均很充足，有利于对流暴雨的发生。

根据7月19日08:00杨六乞卜站地面温度和露点温度对临近探空站进行订正后的探空曲线图（图5a）可见，750 hPa以下湿度较大，$T-Td$≤5 ℃，400 hPa附近$T-Td>20$ ℃，有干气流侵入，存在显著的上干下湿的特征，具有较好的热力不稳定条件。抬升凝结高度较低为0.81 km，0 ℃层高度达5.68 km，具有较深厚的暖云层。低层存在逆温层，有利于不稳定能量的积聚，对流有效位能达2801.6 J·kg^{-1}，抬升指数和沙氏指数分别为−1.9 ℃和−1.11 ℃，K指数达40 ℃，说明层结不稳定性很强，深层（0~6 km）垂直风切变为19 m·s^{-1}，中等强度的垂直风切变有利于组织性完好的对流风暴的发展和维持[16]。

3.2.3 *抬升条件* 沿大暴雨区中心点（41°N、109°E）做垂直速度的时间-高度剖面（图5b），从19日02:00起，暴雨区开始出现上升运动，与降水从02:00之后开始发生是一致的，到19日08:00上升运动显著加

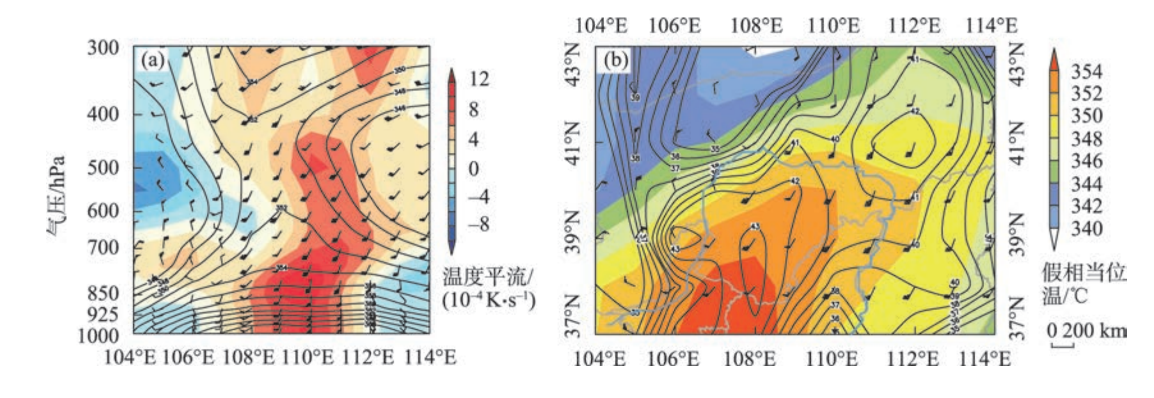


图4 7月19日08:00假相当位温（等值线，单位：K）和温度平流（阴影，单位：10^{-4} K·s^{-1}）沿40°N的垂直剖面（a），K指数（等值线，单位：℃）、700 hPa假相当位温（阴影）和风场分布（b）

Fig. 4 The profile of pseudo-equivalent potential temperature (contour line, units: K) and temperature advection (shaded, units: 10^{-4} K·s^{-1}) along 40°N (a); the distribution of K index (contour line, units: ℃), 700 hPa pseudo-equivalent potential temperature and wind (b) at 08:00 on 19 July, 2018

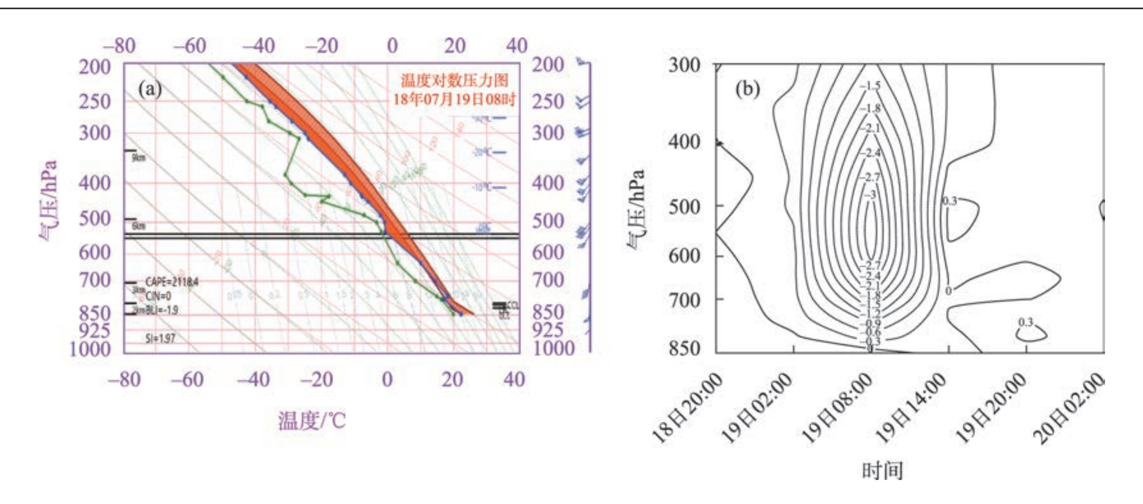


图5 7月19日08:00杨六乞卜站探空曲线图(a),18日20:00—20日02:00大暴雨中心(41°N,109°E)垂直速度(等值线,单位:10^{-1} Pa·s^{-1})的时间-高度剖面(b)

Fig. 5 T-lnp of Huhhot at 08:00 on July 2018 (a); the time-height profile of vertical velocity at the center of the heavy rain (41°N, 109°E) from 20:00 on 18 to 02:00 on 20 July, 2018 (b)

强;08:00—14:00整层均维持强上升运动,中高层上升运动明显加强,强上升运动持续时间长,与19日07:00—14:00河套地区多站出现短时强降水相吻合,最强上升运动出现在08:00 500 hPa左右,包头市杨六乞卜在07:00—08:00出现大于80 mm的极端短时强降水;14:00之后,开始出现下沉运动,雨强也逐渐减小,强烈的抬升运动有利于对流暴雨的发生,其持续时间越长,暴雨强度越强。

4 中尺度对流系统的结构特征、发展及其触发机制

4.1 FY-4A云图上中尺度对流系统的结构特征

中尺度对流系统(MCS)在极端暴雨过程中是造成短时强降水的主要贡献系统[10]。从高时空分辨率的FY-4A红外云图演变(图6)可以看出,先后发展的2个MCS造成了本次河套地区的对流暴雨过程。19日04:00(图6a)在河套北部地区有一个较强的孤立对流云团A生成,上风方已出现20 mm·h^{-1}的降水;06:00之后云顶亮温(TBB)≤-52 ℃的冷云面积逐渐增大,TBB增强至-60 ℃以下,到08:00其水平尺度达400~500 km,呈椭圆形分布,对流云团A逐渐加强发展为MCS,08:00—10:00是MCS发展最为强盛的阶段,并沿阴山山脉自西向东缓慢移动,呈准静止状态维持在河套地区沿山一带,其长轴方向和移动方向基本一致,形成"列车效应",快速发展加强的MCS造成河套沿山一带连续出现大于20 mm·h^{-1}以上短时强降水,尤其是在MCS上风方云团边缘、TBB梯度大值区处出现大于50 mm·h^{-1},甚至超过80 mm·h^{-1}的极端短时强降水;12:00之后,对流云团逐渐减弱消散,降水减弱至10 mm·h^{-1}左右。另一对流云团B于08:00在河套南部地区发展成MCS,水平尺度达300 km左右,从08:00—16:00自西向东移动加强,其长轴方向和移动方向基本呈垂直状态;在12:00—14:00 TBB增强至-60 ℃以下时,在上风方TBB梯度的大值区附近也出现了小时雨强超过20 mm,甚至50 mm的情况,但因移动速度较快,强降水不是持续出现在同一地方,基于以上原因,降水强度不及第一阶段的MCS带来的强。2个阶段MCS从生成到减弱过程均伴随不同强度的短时强降水天气,在本次降水过程中持续时间达12 h以上,造成了本次大范围的强降水天气,可见MCS是强降水天气最直接的制造者,其中大暴雨区的对流降水主要是由于第一阶段对流云团MCS沿阴山山脉移动形成的"列车效应"所产生的。

4.2 雷达回波上中尺度对流系统的移动特征

对流降水的大小与中尺度对流系统的移动速度、移动方向和强度密切相关,沿着对流系统移动方向降雨率高的区域尺度越大,降水系统移动越慢持续时间越长,越有可能出现强降水。由图7可见,本次暴雨过程主要受东西向和南北向分布的2条带状回波影响。2:26开始(图略)在大暴雨区上游西北侧有分散的强回波生成,最强回波大于55 dBZ,在低层西南急流的作用下,不断有新的强回波沿着低

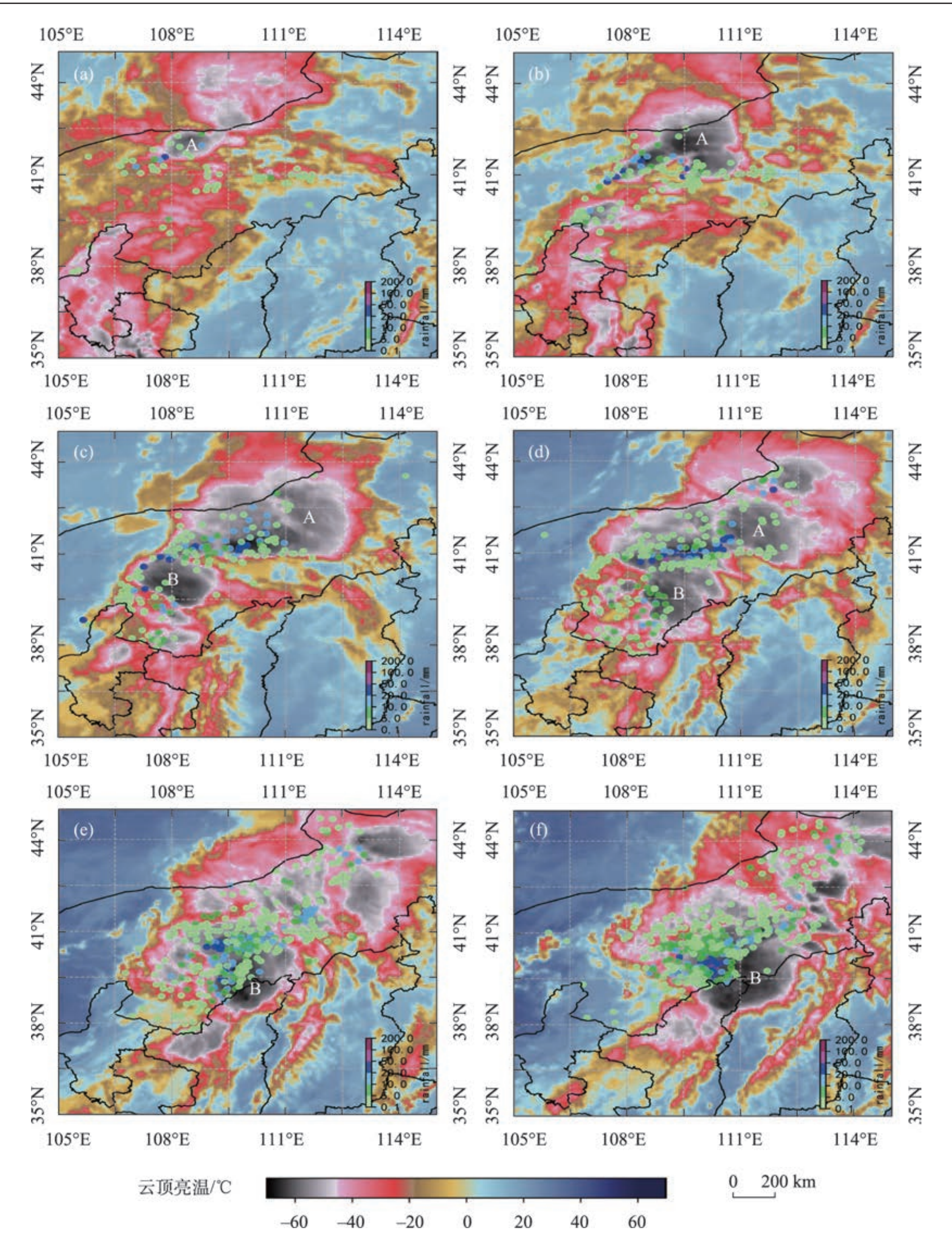
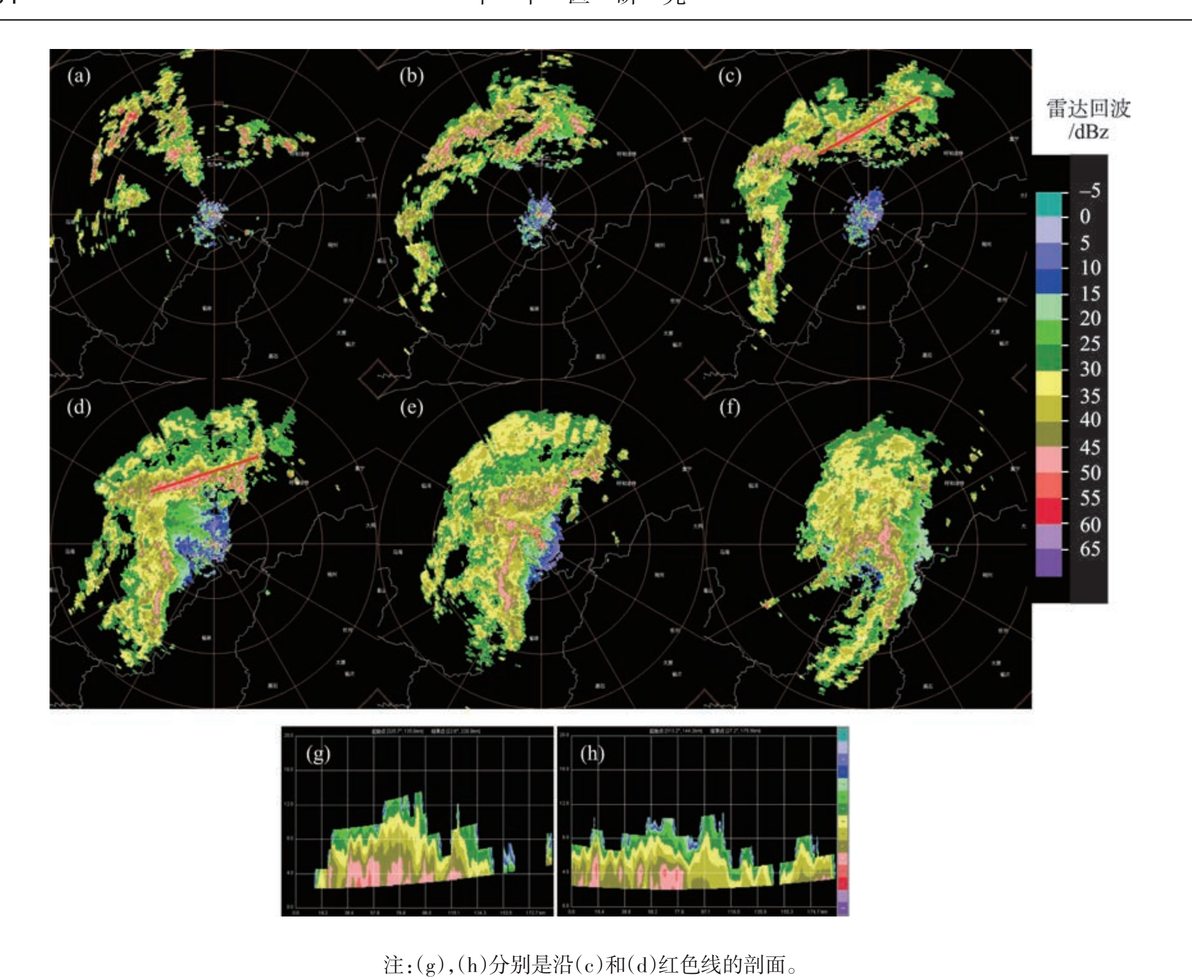


图6 2018年7月19日04:00—14:00 FY-4A高分辨率红外云图云顶亮温(彩色区,单位:℃)及1 h降水量(圆点,单位:mm)的变化

Fig. 6 FY-4A infrared satellite TBB (color area, units: ℃) and variation of hourly precipitation (dot, units: mm) from 04:00 to 14:00 on 19 July, 2018

空急流自西南向东北方向移动;4:48(图7a)分散的降水回波逐渐趋于合并加强,到6:48(图7b)东西向有2条中尺度线状对流回波生成,东西向回波长度达300 km以上,回波强度处于35~55 dBZ之间,南北向回波开始建立,长度约为200 km,相对于东西向回波长度短强度弱,伴随东西向2条线状对流东移;8:02二者已合并成东西向带状强回波(图7c),中心强回波加强,回波强度处于40~60 dBZ,强回波范围变大,降水强度加强,部分站点小时降雨量达20 $mm\cdot h^{-1}$以上,回波走向与阴山山脉基本一致,南北



注：(g)，(h)分别是沿(c)和(d)红色线的剖面。

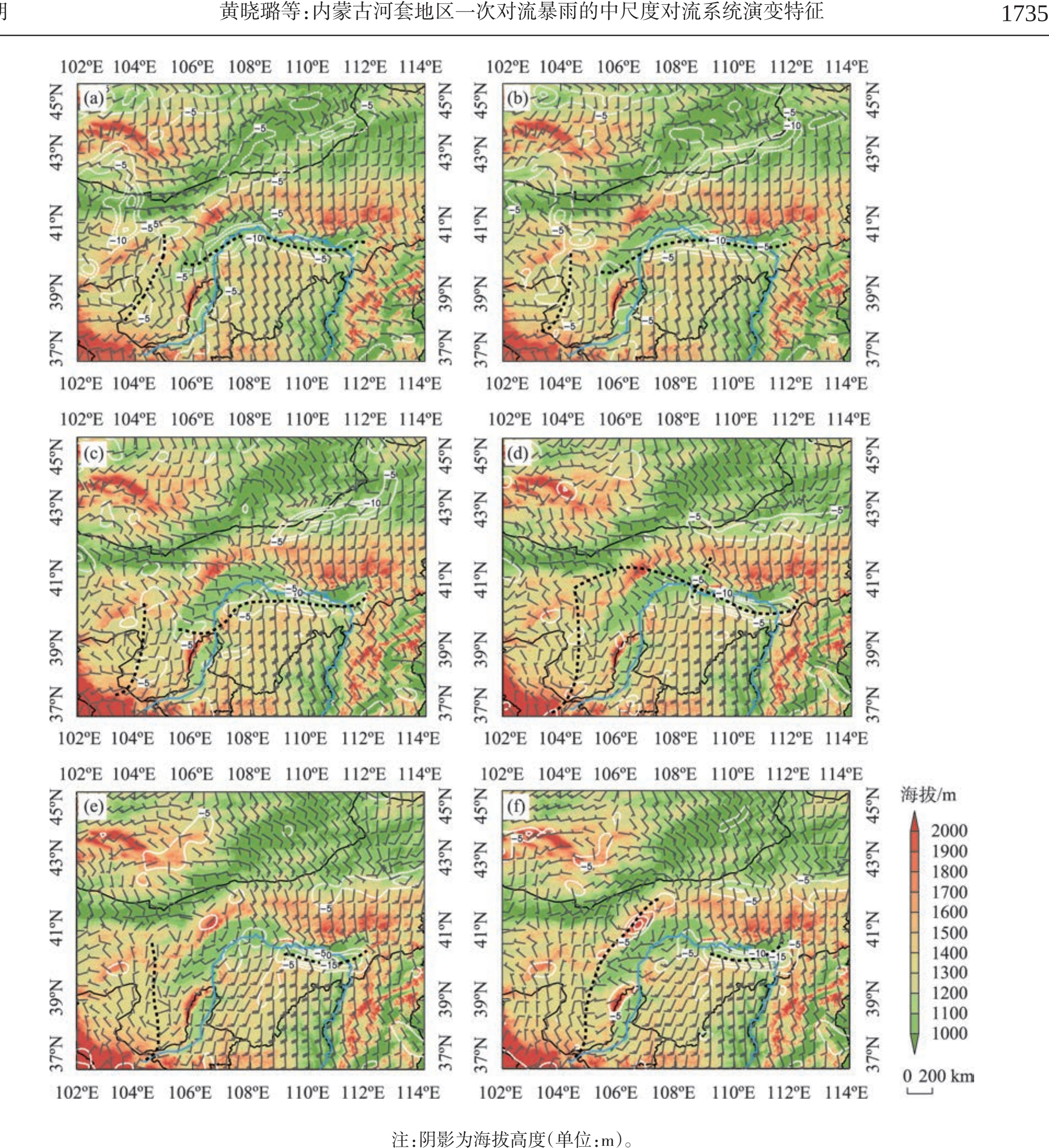
图7 2018年7月19日4:48—13:38鄂尔多斯普勒雷达组合反射率因子演变

Fig. 7 Variation of radar combined reflectivity factor at Erdos from 4:48 to 13:38 on 19, July 2018

向回波也逐渐连成带状分布；从8:02—11:10，东西向带状强回波始终维持着紧密结构沿阴山山脉自西向东移，其西侧不断有新的对流单体生成，说明中尺度对流系统向西不断传播，呈现后向传播特征，造成大范围20 mm·h^{-1}以上强降水，甚至大于50 mm·h^{-1}的强降水；11:10之后，东西向带状回波在移动过程中减弱断裂，南北向带状回波持续时间较长，但移动速度相对较快。分析回波旺盛时的雷达反射率因子垂直剖面(图7g，图7h)，8:02和9:56 40 dBZ以上强回波中心高度均在8 km以下，具有低质心暖云降水特征；东西向带状回波呈现持续紧实分布的结构，低层强回波达50 dBZ以上，可见本次大暴雨过程中，东西向带状回波范围广尺度大，回波强度强，其移动速度缓慢且移动方向与回波长轴方向基本平行，持续时间达4 h以上，强回波自西向东缓慢移动，形成显著的"列车效应"，促进了大暴雨天气；南北向回波虽然持续时间比东西向更长，但是移动方向与回波长轴方向垂直，且移动速度相对较快，所以造成的暴雨强度不及东西向的带状回波。

4.3 中尺度对流系统的触发机制

天气尺度的上升运动通常不会直接触发对流，触发对流的上升运动绝大多数情况下是由中尺度系统提供的[26]。内蒙古河套地区地形复杂，地貌多样，周围环绕着山地、河流和沙漠，北有阴山山脉，海拔高度在1500~2300 m左右，南有蒙古高原，海拔高度在1300~1500 m左右，地势高低起伏。下面结合ERA5逐小时资料和地形分析地面风场的演变特征，本次大暴雨过程河套地区受东西向和南北向2条地面中尺度辐合线的影响。19日2:00开始，阴山山脉以南，蒙古高原以北的河套绿洲地区由东南风转为偏东风(图8)，形成东西向的地面中尺度辐合线；4:00中尺度辐合线与阴山山脉走向基本一致，8:00阴山山脉南麓迎风坡地面风速加强，南侧偏南风达10 m·s^{-1}以上，散度场上低层辐合也明显加强，对应雷达图上有雷达回波发展且反射率因子逐步增大，最



注:阴影为海拔高度(单位:m)。

图8 7月19日04:00—14:00地面风场(风羽,单位:m·s^{-1})、散度(白色虚线,单位:10^{-5} s^{-1})和地面辐合线(黑色虚线)的演变

Fig. 8 The variation of surface wind (barb, units: m·s^{-1}), divergence (white dotted line, units: 10^{-5} s^{-1}) and convergence line (black dotted line) from 04:00 to 14:00 on 19 July, 2018

强反射率因子达50 dBz以上,降水增强,小时降雨量集中在30~60 mm左右,最大雨强可达80 mm以上,4:00—10:00地面东西向中尺度辐合线一直在大暴雨区稳定维持少动,散度场中的强辐合区也维持到10:00,之后伴随东西向中尺度辐合线东移减弱,辐合中心逐渐东移,降水强度也逐渐减弱,维持在10 mm·h^{-1}左右。南北向中尺度辐合线从4:00—8:00维持在河套上游,之后开始向东移动,持续时间较长,18:00之前一直影响河套地区,伴随降水强度主要在10~20 mm·h^{-1}范围,但移动速度较快,所以产生的暴雨强度不如东西向强。

综上所述,东西向和南北向的地面中尺度辐合线与雷达带状回波的位置高度契合,说明本次大暴雨过程中尺度对流系统的主要触发机制是地面中尺度辐合线,其形成、维持和移动促进了中尺度对流系统的发生发展。本次大暴雨过程还与地形作用紧密相连,大暴雨区主要位于阴山山脉南麓迎风坡区,50 mm以上的暴雨区也沿阴山山脉成带状分

布,说明低层盛行偏南风急流进入河套地区受阴山山脉地形阻挡,一方面是山脉海拔高度高、坡度大,对偏南暖湿急流的强迫抬升作用,另一方面上游冷空气进入大暴雨区,冷暖气流在迎风坡作用下强烈辐合进一步促进上升运动,提高了降水效率,可见河套地区的特殊地形对中尺度对流系统触发提供了有利条件。本次对流暴雨与地面辐合线、阴山山脉地形抬升及低空急流的脉动等作用有密切联系,地面中尺度辐合线是触发中尺度对流系统的主要原因,中尺度辐合线与阴山山脉呈现一致的分布有利于降水的持续,促使本次大暴雨的过程发生。

5 结 论

本文利用常规气象观测资料、卫星云图、多普勒天气雷达资料和再分析资料,对2018年7月19日内蒙古河套地区对流暴雨天气的环流背景和环境场条件、中尺度对流系统的演变特征及触发因子进行了详细分析,得到以下结论:

(1) 本次暴雨过程表现为雨强大、持续时间长、强降水范围集中、对流性降水特征明显并与地形密切相关。副热带高压的稳定维持、500 hPa高空槽、低层切变线及西南低空急流、300 hPa高空急流和地面低压的配合为本次对流暴雨过程提供了有利的大尺度环流背景场。

(2) 低层西南急流稳定维持提供的充足水汽输送,假相当位温高能舌,深厚的暖云层,大于40 ℃的K指数,高强度"瘦高型"对流有效位能,高空槽后冷平流的入侵和上干下湿的不稳定气层是本次过程产生强对流暴雨的有利环境条件。

(3) 东西向和南北向2个先后生成的MCS共同导致本次大暴雨过程的发生,二者持续长达12 h以上,其中大暴雨区的对流暴雨主要是由于东西向MCS沿阴山山脉缓慢移动形成的"列车效应"所产生的,20 mm·h^{-1}以上的短时强降水出现在上风向云团边缘TBB梯度大值区附近,降水强度与对流云团的发展程度密切相关。

(4) 在强对流暴雨阶段,东西向带状回波范围广、尺度大、强度强,具有低质心暖云降水特征,其移动速度缓慢且移动方向与回波长轴方向基本平行,强回波自西向东缓慢移动形成显著的"列车效应",造成了大暴雨区5 h以上的连续性强降水,南北向回波虽然持续时间比东西向更长,但是移动方向与回波长轴方向垂直,且移动速度相对较快,所以造成的暴雨强度不及东西向的带状回波。

(5) 地面中尺度辐合线是触发中尺度对流系统的主要原因,河套地区的复杂地形及低空急流的脉动进一步促进了对流触发,地面中尺度辐合线与阴山山脉呈现几乎重叠的分布有利于降水的持续,促使本次对流暴雨过程的发生。

参考文献(References):

[1] 宋桂英, 李孝泽, 孙永刚, 等. 内蒙古干旱-半干旱带2012年"7·20"极端暴雨事件的特征及成因[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 883-889. [Song Guiying, Li Xiaoze , Sun Yonggang , et al. Characteristics and causes of the extreme rainstorm July 20 2012 in the arid and semiarid zone in Inner Mongolia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 883-889.]

[2] 张桂莲, 杭月荷, 付丽娟, 等. "列车效应"诱发的一次河套地区致灾暴雨成因[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 788-795. [Zhang Guilian, Hang Yuehe , Fu Lijuan, et al. Causes of a torrential rainstorm induced by "train effect" in Hetao area[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 788-795.]

[3] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 等. 近60 a来内蒙古极端降水时空变化及其影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 74-85. [Ma Aihua, Yue Dapeng, Zhao Jingbo, et al. Spatiotemporal variation and effect of extreme precipitation in Inner Mongolia in recent 60 years [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 74-85.]

[4] 王澄海, 杨金涛, 杨凯, 等. 过去近60 a黄河流域降水时空变化特征及未来30 a变化趋势[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 708-722 . [Wang Chenghai, Yang Jintao, Yang Kai,et al. Changing precipitation characteristics in the yellow river basin in the last 60 years and tendency prediction for next 30 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 708-722.]

[5] 丁一汇. 陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 616-626. [Ding Yihui. Contributions of Prof Tao Shiyan to the study of formation conditions and mechanisms of heavy rainfalls in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(4): 616-626.]

[6] 何光碧, 曾波, 郁淑华, 等. 青藏高原周边地区持续性暴雨特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 865-874. [He Guangbi, Zeng Bo, Yu Shuhua, et al. Analysis of durative rainstorm characteristics occurred in the ambient area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 865-874.]

[7] 李晓霞, 尚大成, 谌芸, 等. 甘肃陇南两次不同强度暴雨天气的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1389-1399. [Li Xiaoxia, Shang Dacheng, Chen Yun, et al. Mesoscale analysis on two different intensity rainstorm processes in the east of Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 1389-1399.]

[8] 刘新伟, 叶培龙, 伏晶, 等. 高原切边线形态演变对高原边坡一

次降水过程的影响分析[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 245-253. [Liu Xinwei, Ye Peilong, Fu Jing, et al. The influence of the morphological evolution of plateau shear line on a precipitation weather process over plateau slope[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 245-253.]

[9] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等. 西北区东部一次暴雨的数值模拟试验[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 258-266. [Wang Jingsong, Li Yaohui, Kang Fengqin, et al. Characteristic quantity analyses of boundary layer from mesoscale model[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(3): 258-266.]

[10] 杨晓军, 叶培龙, 徐丽丽, 等. 一次青藏高原东北侧边坡强对流暴雨的中尺度对流系统演变特征[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 839-849. [Yang Xiaojun, Ye Peilong, Xu Lili,et al. The variation characteristics of mesoscale convection system in a severe convective torrential rain over the northeast slope of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 839-849.]

[11] 井喜, 李强, 屠妮妮, 等. 黄土高原一次β中尺度突发性暴雨特征及成因[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 242-248. [Jing Xi, Li Qiang, Tu Nini, et al. Analysis on characteristics and causation of a meso β scale paroxysmal rainstorm on Loess Plateau[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(3): 242-248.]

[12] 曾勇, 杨莲梅. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 475-484. [Zeng Yong, Yang Lianmei. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 475-484.]

[13] 王宝鉴, 孔祥伟, 傅朝, 等. 甘肃陇东南一次大暴雨的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1551-1564. [Wang Baojian, Kong Xiangwei, Fu Chao, et al. Analysis on mesoscale characteristics of a rainstorm process in southeastern Gansu[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(6): 1551-1564.]

[14] 付双喜, 张鸿发, 楚荣忠. 河西走廊中部一次强降水过程的多普勒雷达资料分析[J].干旱区研究, 2009, 26(5): 656-663. [Fu Shuangxi, Zhang Hongfa, Chu Rongzhong. Analyzing on a heavy precipitation with doppler radar data in the middle of Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2009, 26(5): 656-663.]

[15] 慕建利, 李泽椿, 谌芸, 等. 一次陕西关中强暴雨中尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 148-161. [Mu Jianli, Li Zechun, Chen Yun, et al. Feature analyses of mesoscale convective system of a heavy rainfall in the central Shaanxi plain[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(1): 148-161.]

[16] 俞小鼎. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 2012, 38(11): 1313-1329. [Yu Xiaoding. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(11): 1313-1329.]

[17] 孙继松, 何娜, 王国荣, 等. "7·21"北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 218-225. [Sun Jisong, He Na, Wang Guorong, et al. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(3): 218-225.]

[18] 赵庆云, 张武, 陈晓燕, 等. 一次六盘山两侧强对流暴雨中尺度对流系统的传播特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 767-776. [Zhao Qingyun, Zhang Wu, Chen Xiaoyan, et al. Propagation characteristics of mesoscale convection system in an event of severe convection rainstorm over both sides of Liupanshan Mountains[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 767-776.]

[19] 贺晓露, 汪小康, 郝元甲, 等. 复杂地形影响下鄂东北梅雨锋大暴雨MCS的触发和演变[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(6): 611-619. [He Xiaolu, Wang Xiaokang, Hao Yuanjia, et al. Initiation and evolution of MCS of Meiyu frontal heavy rain event in the complex terrain of Northeast Hubei[J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(6): 611-619.]

[20] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008年"7·22"襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955. [Liao Yishan, Feng Xin, Shi Yan, et al. Analysis of the mechanism for "2008·7·22" excessive rain event in Xiangfan with a focus on the terrain effect[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(6): 945-955.]

[21] 张家国, 周金莲, 谌伟, 等. 大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J]. 气象学报, 2015, 41(2): 291-304. [Zhang Jiaguo, Zhou Jinlian, Chen Wei, et al. The structure and propagation characteristics of the extreme rain producing MCS on the westside of Dabie Mountain[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 41 (2): 291-304.]

[22] 付双喜, 张洪芬, 杨丽杰, 等. 地形影响下祁连山北麓不同类型降水特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1226-1234. [Fu Shuangxi, Zhang Hongfen, Yang Lijie, et al. Comparative analysis of different types of precipitation characteristics in the northern foot of Qilian Mountain under the influence of topography[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1226-1234.]

[23] 韩经纬, 吴学宏, 宋桂英, 等. 2006年春季内蒙古久旱转雨过程分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 235-240. [Han Jingwei, Wu Xuehong, Song Guiying, et al. Characteristic ananlysis of prolonged drought turning to rain in Inner Monglia in spring 2006[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(2): 235-240.]

[24] 李春筱, 董治宝, 徐永旺, 等. 内蒙古额济纳旗一次局地大到暴雨的成因分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 774-779. [Li Chunxiao, Dong Zhibao, Xu Yongwang, et al. Cause of a local heavy hard rain in Ejina Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(3): 774-779.]

[25] 孟雪峰, 孙永刚, 萨日娜, 等. 河套气旋发展东移与北京暴雨的关系[J]. 气象, 2013, 39(12): 1542-1549. [Meng Xuefeng, Sun Yonggang, Sa Rina, et al. Correlation between eastward developing of Hetao cyclone and the severe rainstorm in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(12): 1542-1549.]

[26] Doswell C A. The distinction between large-scale and meso-scale contribution to severe convection: a case study example[J]. Weather Forecast, 1987, 2(1): 3-16.

Various characteristics of the mesoscale convection system of a convective rainstorm in the Hetao area of Inner Mongolia

HUANG Xiaolu[1], LI Ruiqing[2], LI Linhui[3], LIN Hongjie[4], YAO Lebao[1]

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Huhhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia University, Huhhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Service, Huhhot 010051, Inner Mongolia, China; 4. Inner Mongolia Meteorological Training Center, Huhhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on conventional observation data, FY4A satellite cloud pictures, Doppler radar data, and reanalysis data, the occurrence and various characteristics of the mesoscale convective system (MCS) of the heavy rain process in the Hetao area of Inner Mongolia on July 19, 2018, were analyzed. The results show that: (1) The stable and less moving subtropical high, the 500hPa upper trough, the low-level shear line, the low-level southwest jet, the 300 hPa upper-altitude jet, and the surface low pressure provide a favorable circulation background. (2) The stable low-level southwest jet provides enough water vapor transport. Pseudo-equivalent potential temperature high energy tongue, deep warm cloud layer, high-intensity CAPE, cold advection intrusion behind the upper trough, and the unstable air layer together provide better environmental conditions for the heavy rainstorm. (3) The two successively developed MCS caused the heavy rain process. The convective rainstorm is mainly caused by the slow movement of the east-west MCS along the Yinshan Mountains, 20 $mm \cdot h^{-1}$ heavy rain appears at the edge of upwind cloud clusters and the strong TBB gradient areas. (4) The east-west echo moves slowly along the direction of the echo wavelength axis. The strong echo moves slowly from west to east to form a significant “train effect,” causing continuous heavy rain for more than five hours. The north-south direction echo lasts longer, but its moving direction is vertical to the direction of the echo wavelength axis, and the moving speed is faster, so the intensity of the rainstorm produced is weaker than the east-west direction. (5) The surface convergence line is the main factor that triggered the MCS occurrence and development, Hetao area complex terrain, and the pulsation of the low-level jet both promote the effect. The almost overlapping distribution of the surface mesoscale convergence line and the Yinshan Mountains are favorable to the continuation of rain and the convective rainstorm.

Keywords: convective rainstorm; MCS; train effect; Hetao area; Inner Mongolia